

Švytuojamojo variklio-kompresoriaus švytavimų centro valdymas

S. Kudarauskas

Baltijos pr. 107-38, 93223 Klaipėda, Lietuva

A. Senulis, L. Simanyrienė

*Klaipėdos universitetas, Elektrotechnikos katedra,
Bijūnų g. 17, 91225 Klaipėda, Lietuva*

Ižanga

Maždaug prieš šimtą metų pirmasis švytuojamųjų elektros mašinų tyrėjas prancūzų mokslininkas Paul Boucherot atliko įdomų ir sėkmingą eksperimentą, prie švytuojamojo sinchroninio variklio prijungęs stūmoklinį kompresorių [1]. Per visą tolesnį laikotarpį tęsiamos pastangos sukurti efektyvų ir patikimą švytuojamojo variklio-kompresoriaus¹ agregatą, gebantį konkuruoti su kompresoriais, varomais įprastinių elektros variklių.

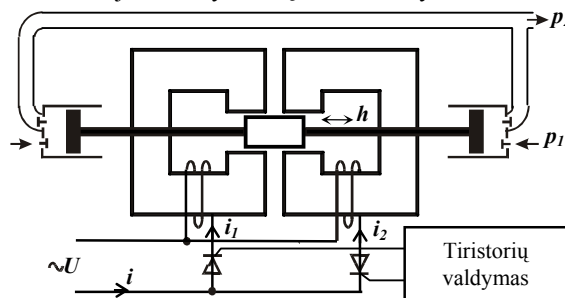
Viena iš kliūčių, trukdančių įgyvendinti šią idėją, yra švytuojamojo variklio ir stūmoklinio (ar membraninio) kompresoriaus parametrų suderinimo problema, kadangi abi šios pavaros dalys yra netiesinės sistemos. Kita aktuali problema – variklio judžiosios dalies (kartu ir kompresoriaus stūmoklio) švytavimų centro valdymas (stabilizavimas). Dažniausiai švytavimų centrą bandoma stabilizuoti spyruoklėmis, t. y. mechaninės dalies elementais, kurie komplikuoja agregatą, mažina jo patikimumą (pvz., [2]). Mūsų daugiametė šių įrenginių tyrimo ir kūrimo patirtis rodo, kad įmanoma sukurti bespyruoklę kompresoriaus pavarą, švytavimų centrą stabilizuojant elektriškai. Todėl šiame darbe pateikiami nauji tyrimų rezultatai, susiję su švytuojamojo sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio švytavimų centro valdymo galimybėmis (tarp jų – ir bejutiklio).

Švytavimų centro valdymo reikmė

Švytuojamojo variklio-kompresoriaus įrenginiuose siūlomi naudoti tiek vienus, tiek dvipusius (simetrinius) kompresoriai (pvz., [3]). Pirmuoju atveju dažniausiai yra naudojama spyruoklė, kompensuojanti nuolatinę stūmoklio reakcijos jėgos dedamąją, o kartu lemianti ir švytavimų centro padėtį. Antruoju atveju stūmoklį (ar stūmoklius) veikianti dujų slėgio nuolatinė jėga gali atsisverti, todėl iš principo yra įmanoma bespyruoklė konstrukcija. Deja, realizuoti tokią konstrukciją sunkina tai, kad dvipusis kompresorius švytavimų centro atžvilgiu yra nestabilus: atsiradus atsitiktiniam švytavimų centro poslinkiui, randasi jėga, didinanti šį poslinkį [4]. Šis poslinkis gali didėti tiek,

kad viena kryptimi slegiamos dujos iš cilindro nebeišstumiamos (t. y. veikia kaip pneumatinė spyruoklė), o išstumiamos tikrai priešingos eigos metu. Dėl to sumažėja kompresoriaus našumas, naudingumas. Kai kada stūmoklis gali imti daužyti cilindro dugną. Todėl būtina riboti stūmoklio švytavimų centro poslinkį, ir tai galėtų atlikti pats variklis.

Švytuojamojo variklio-kompresoriaus agregatui gali būti naudojamas sinchroninis pulsuojamąsios srovės variklis [5], pasižymintis konstrukcijos paprastumu, pigumu (palyginti su sinchroniniu žadinamuoju varikliu). Tokio simetrinio įrenginio schema pavaizduota 1 pav. Pulsuojamoji srovė gali būti formuojama nevaldomais ar valdomais elementais (tiristoriais); pastarieji elementai gali būti naudojami ir švytavimų centrui valdyti.



1 pav. Švytuojamojo sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio ir dvipusio kompresoriaus konstrukcijos schema

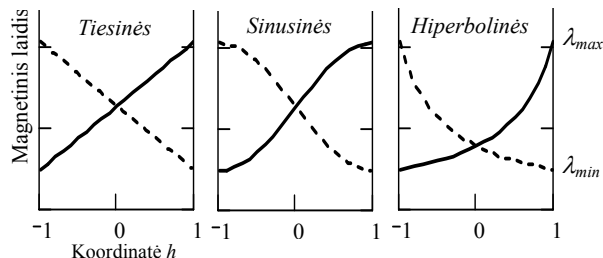
Švytuojamasis sinchroninis pulsuojamąsios srovės variklis gali pasižymėti švytavimų centrą stabilizuojančiomis savybėmis, kai turime tam tikrą variklio išvystomos jėgos priklausomybę nuo judžiosios dalies padėties ir srovės [6]. Be kita ko, tokias variklio savybes lemia magnetolaidžio išotinio reiškinys. Teigiamo standumo efektas švytavimų centro atžvilgiu gali rasti ir dėl priežasčių, kurios nagrinėjamos kitame skyrelyje.

Švytuojamojo sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio švytavimų centro ypatybės

Siekiant nustatyti nagrinėjamojo variklio savybes švytavimų centro atžvilgiu, buvo sudarytas ir tiriamas įvairių variklio variantų matematinis modelis. Visais

¹ Kadangi tokie agregatai vadinami labai įvairiai, tai pasiūlėme šį terminą, kaip geriausiai atspindintį įrenginio struktūros esmę [1].

atvejais nagrinėtas variklis su monotone magnetinio laidžio λ priklausomybe nuo judžiosios dalies padėties – koordinatės h . Tirti trys būdingi $\lambda(h)$ priklausomybės variantai: tiesinė, sinusinė, hiperbolinė; šios priklausomybės pavaizduotos 2 pav. Kaip matome, visais atvejais imamos vienodos ribinės magnetinių laidžių vertės λ_{min} ir λ_{max} , o ribinė santykinės koordinatės vertė yra ± 1 .



2 pav. Būdingos abiejų variklio sekcijų magnetinio laidžio λ priklausomybės nuo koordinatės h

Pirmiausiai skaitiniu metodu (Mathcad terpėje) buvo imituojami nevaldomo pulsuojamosios srovės variklio nusistovėję švytavimai, laikant, kad variklis maitinamas sinusine įtampa ir kad judžiosios dalies švytavimai taip pat yra sinusiniai ir jų amplitudė yra H , o pradinė fazė α . Taip pat įvertinamas galimas švytavimų centro poslinkis ΔH , kuris tampa vienu iš judžiosios dalies padėties argumentų:

$$H(t, \alpha, H, \Delta H) = H \sin(\omega t + \alpha) + \Delta H. \quad (1)$$

Toliau skaičiuojamas ekvivalentinis variklio standumas švytavimų centro atžvilgiu k_{sp} . Jeigu šis standumas teigiamas, tai švytavimų centras yra stabilizuojamas (ir atvirkščiai). Skaičiavimo eiga tokia: spendžiamos abiejų simetrinio variklio sekcijų netiesinės įtampų balanso diferencialinės lygtis (įvertinant (1) sąlygą) ir randamos srovės i_1 ir i_2 (žr. 1 pav.); skaičiuojama bendros išvystomos jėgos pirmoji harmonika $\underline{F}_1$ ir nuolatinė dedamoji F_0 . Toliau skaičiuojamas ekvivalentinis standumas

$$k_{sp} = \frac{F_0}{\Delta H} \quad (2)$$

ir kompleksinė mechaninė varža

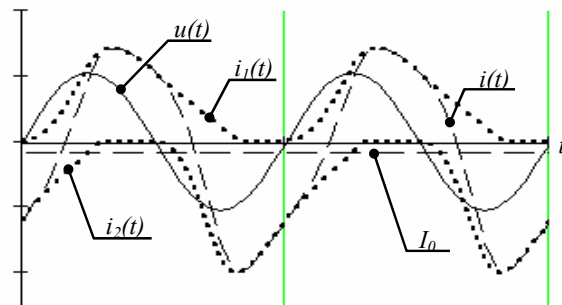
$$\underline{Z} = \frac{\underline{F}_1}{j\omega \cdot H \cdot e^{j\alpha}}. \quad (3)$$

Ekvivalentinio standumo efektas aiškintinas tuo, kad švytavimų centro poslinkis ΔH atitinkamai pakeičia sroves. Pavyzdžiui, švytavimų centrui pasislinkus į dešinę (2 pav.), į tą pačią pusę judžiąją dalį traukiančios variklio sekcijos vidutinis magnetinis laidis (ir induktyvumas) padidėja, todėl srovė sumažėja. Taigi gali atsirasti jėgos dedamoji, kuri stengiasi mažinti švytavimų centro poslinkį.

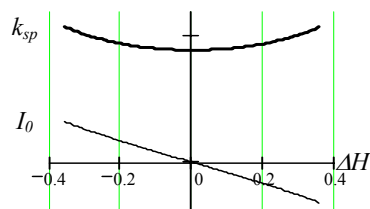
Ekvivalentinio standumo atsiradimo efektą paaiškina 3 pav. pavaizduotos kintamųjų kreivės. Čia matome konkrečios variklio apkrovos ir ΔH atvejo nusistovėjusio režimo dviejų periodų kintamuosius ($\lambda(h)$ tiesinės): įtampą $u(t)$, abiejų variklio sekcijų sroves $i_1(t)$ ir $i_2(t)$, bendrą srovę

$i(t)$ bei jos nuolatinę dedamąją I_0 . Taigi ši atsiradusi nuolatinės srovės dedamoji ir sukuria nuolatinę jėgą, nukreiptą prieš švytavimų centro poslinkį.

Keičiant švytavimų centro poslinkio dydį, apskaičiuota ekvivalentinio standumo ir nuolatinės srovės dedamosios priklausomybė nuo poslinkio ΔH , kuri pavaizduota 4 pav. (konkrečios apkrovos atveju).

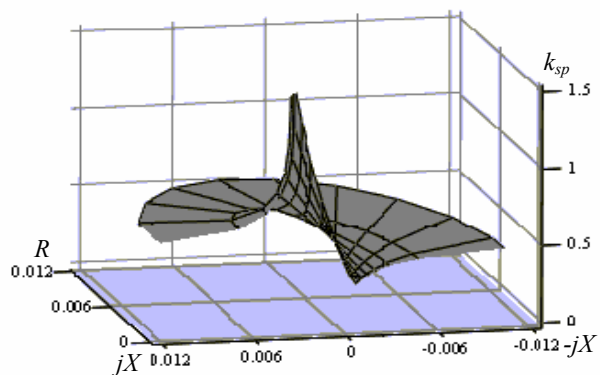


3 pav. Konkrečios apkrovos atveju nusistovėjusio režimo srovės



4 pav. Konkrečios apkrovos atveju ekvivalentinio standumo k_{sp} ir nuolatinės srovės dedamosios I_0 priklausomybės nuo ΔH

Kaip matyti iš 4 pav., ekvivalentinis standumas šiek tiek priklauso nuo švytavimų centro poslinkio, o bendrosios variklio srovės nuolatinė dedamoji praktiškai proporcinga šiam poslinkiui. Taigi preliminariai galima teigti, kad nuolatinė srovės dedamoji gali informuoti apie švytavimų centro poslinkį ir ji gali būti panaudota bejutikliam šio poslinkio valdymui.

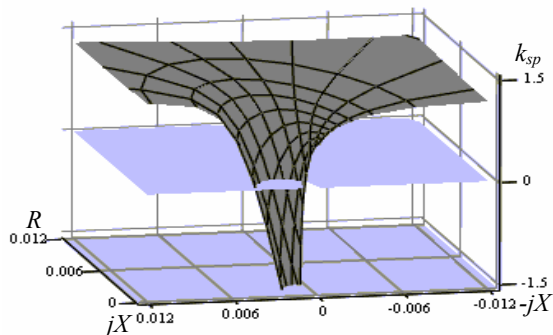


5 pav. Ekvivalentinio standumo priklausomybė nuo kompleksinės mechaninės varžos $\underline{Z}$ (tiesinės $\lambda(h)$)

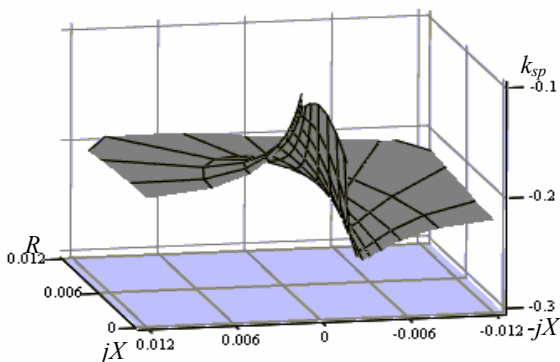
Bendresnėms išvadoms gauti būtina nagrinėti visą galimą variklio apkrovos kitimo diapazoną, t.y. galimą kompleksinės mechaninės varžos $\underline{Z} = R + jX$ kitimą. Šiuo atveju tenka nagrinėti ekvivalentinio standumo k_{sp} priklausomybę nuo kompleksinio argumento $\underline{Z}$, kuri grafiškai gali būti interpretuojama paviršiumi virš

kompleksinio argumento plokštumos. Tokie paviršiai, atitinkantys 2 pav. variklių variantus, matomi 5–7 pav.

Kaip matyti 5 pav., variklio su tiesinėmis magnetinio laidžio priklausomybėmis nuo judžiosios dalies padėties, ekvivalentinis standumas k_{sp} visame kompleksinės mechaninės varžos $\underline{Z}$ kitimo plote yra teigiamas. Variklio su sinusinėmis $\lambda(h)$ priklausomybėmis (6 pav.) ekvivalentinis standumas didesniame $\underline{Z}$ kitimo plote taip pat yra teigiamas, tačiau tam tikroje srityje tampa neigiamas. Variklio su hiperbolinėmis $\lambda(h)$ (7 pav.) visame $\underline{Z}$ kitimo plote yra neigiamas (destabilizuojantis švytavių centras). Tokius skirtumus lemia elektromagnetinės jėgos priklausomybė ne tikiai nuo srovės, bet ir nuo magnetinio laidžio išvestinės koordinatės atžvilgiu.



6 pav. Ekvivalentinio standumo priklausomybė nuo kompleksinės mechaninės varžos $\underline{Z}$ (sinusinės $\lambda(h)$)



7 pav. Ekvivalentinio standumo priklausomybė nuo kompleksinės mechaninės varžos $\underline{Z}$ (hiperbolinės $\lambda(h)$)

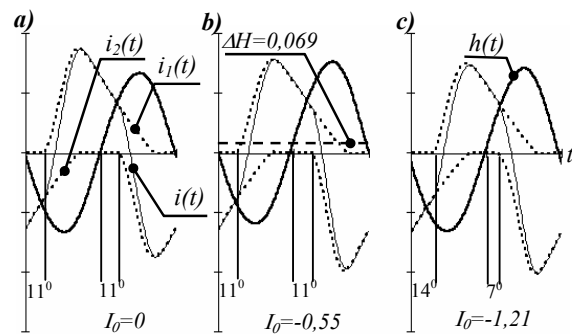
Pažymėtina, kad ekvivalentinio standumo ypatumai visais atvejais labiausiai išryškėja tada, kai švytavių amplitudė artėja prie maksimalios vertės. Sudėtingos ekvivalentinio standumo priklausomybės nuo variklio apkrovos komplikuoja švytavių centro valdymą.

Švytavių centro tiristorinis valdymas

Švytuojamajam sinchroniniam pulsuojamajai srovei varikliui paprasčiausia taikyti tiristorinį valdymą. Kai reikia valdyti ne tikiai švytavių amplitudę, bet ir švytavių centrą, būtina abiejų variklio sekcijų tiristorių uždegimo kampą valdyti skyrium (žr. 1 pav.).

Tiristorinis simetrinio pulsuojamajai srovei variklio valdymas buvo tiriamas taip pat, kaip ir nevaldomas variklis, aprašytas ankstesniame skyrelyje. Švytavių

centro valdymo galimybes iliustruoja tiriamojo variklio imitavimo pavyzdys, kurio metu gautų kintamųjų grafikai pavaizduoti 8 pav.



8 pav. Švytavių centro tiristorinio valdymo kintamųjų kreivės

Paveiksle 8a matome atskirų variklio sekcijų sroves $i_1(t)$, $i_2(t)$ ir bendrą srovę $i(t)$ bei judžiosios dalies koordinatės kreivę $h(t)$ konkrečios simetrinės apkrovos atveju nusistovėjusio režimo metu. Čia taip pat užrašyti tiristorių uždegimo kampai, kuriems esant vienodiems, bendros srovės nuolatinė dedamoji I_0 lygi nuliui. Jeigu apkrova tampa asimetrinė, tai švytavių centras gali pasislinkti. 8b pav. imituotas nuolatinės jėgos poveikis (pavyzdžiui, judžiosios dalies sunkio jėga, pakeitus horizontalią variklio padėtį į vertikalią), dėl kurio pasislenka švytavių centras, atsiranda srovės nuolatinė dedamoji. Atitinkamai pakeitus tiristorių uždegimo kampus (8c pav.), gali būti išlaikyta ta pati švytavių amplitudė, o švytavių centro poslinkis panaikintas.

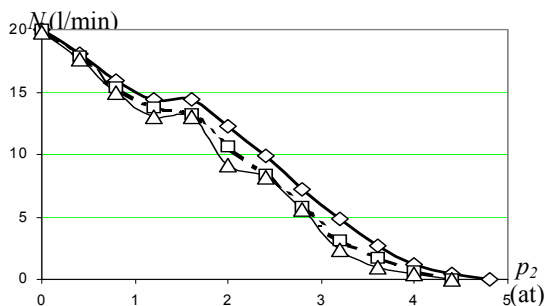
Kaip buvo pažymėta ankstesniame skyrelyje ir kaip tai parodyta 8b pav., simetrinio maitinimo atveju apie švytavių centro dreifą gali informuoti srovės nuolatinė dedamoji. Tačiau kaip parodyta 8c pav., asimetrizavus maitinimą, srovės nuolatinė dedamoji dar labiau išauga, nors švytavių centro dreifas išnyksta. Taigi norint realizuoti bejutiklį švytavių centro valdymą, grindžiamą srovės nuolatinės dedamosios matavimu, būtina naudoti sudėtingą valdymo algoritmą.

Švytuojamojo variklio-kompresoriaus tyrimas

Siekiant patikrinti kompresoriaus pavaros švytavių centro valdymo reikmę ir kai kuriuos variklio matematinio modelio imitavimo rezultatus, buvo tirtas švytuojamasis variklis-kompresorius, sukurtas Klaipėdos universiteto Elektrotechnikos katedroje (tiksliau – buvusioje KPI Klaipėdos fakulteto Elektrotechninių disciplinų katedroje). Tai 150 W galios, suslegiantis orą iki 5 at, bespyruoklis švytuojamasis variklis-kompresorius, kurio principinė schema atitinka 1 pav.

Bandymų metu buvo keičiama kompresoriaus padėtis iš horizontalios (normalios) į vertikalią, pasukant agregatą priešingomis kryptimis. Taip rasdavosi judžiąją dalį veikianti jos sunkio jėga, sukurianti atitinkamą švytavių centro dreifą. Išmatavus srovės nuolatinę dedamąją, praktiškai pasitvirtino 4 pav. pavaizduotas švytavių centro poslinkio ir srovės nuolatinės dedamosios tarpusavio priklausomybės teisiškumas.

Svarbi kompresoriaus darbo charakteristika – našumo N priklausomybė nuo suspaudimo slėgio p_2 . Tokios išmatuotos charakteristikos pavaizduotos 9 pav. (ištininė storesnė linija – horizontali padėtis ir $\Delta H=0$, kitos dvi linijos – vertikalios padėties ir $\Delta H \neq 0$).



9 pav. Kompresoriaus našumo kreivės, kai švytvimų centras nepasislinkęs (viršutinė kreivė) ir kai jis pasislinkęs

Kaip matome iš 9 pav., švytvimų centro poslinkis sumažina kompresoriaus našumą. Našumo kreivių su priešingų krypčių švytvimų centro dreifais nesutapimas aiškintinas tam tikra tirtu kompresoriaus asimetrija.

Išvados

1. Daugeliu atveju aktualu valdyti (stabilizuoti) švytuojamą variklio pavaros švytvimų centrą; tai ypač svarbu stūmoklinio kompresoriaus pavarose.

2. Galimas švytuojamą sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio švytvimų centro bejutiklis

tiristorinis valdymas, naudojant sudėtingą valdymo algoritmą.

Literatūra

1. **Kudarauskas S., Senulis A.** Historical Development and Theoretical Principles of Compressors Driven by Oscillating Electrical Motor // Proc. of International Conference on Compressors and Their Systems, 8-10 September 2003, London, P.473-482.
2. **Kim J-W., Heo J-T., Kim J-D., Jung W-H., Hyun S-Y.** Linear compressor for natural refrigerant // Proc. of International Conference on Compressors and Their Systems, 8-10 September 2003. – London. – P.483-491.
3. **Chausson A.** Dispositif électromagnétique pour compression ou le pompage d'un fluide // Exposé d'invention, Confédération Suisse, N. 349632. – 1960.
4. **Maironis A., Kudarauskas S.** Stūmoklinio kompresoriaus, varomo švytuojančio judesio elektros variklio, darbo stabilumo klausimu // Mechaninė technologija, II. – Vilnius: Mintis, 1969. – P. 103-109.
5. **Guseinovicė E., Simanynienė L., Kudarauskas S.** Oscillating Synchronous Pulsating Current Motor in the Piston Compressor's Drive // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2002. – Nr. 3(38). – P. 36-40.
6. **Simanynienė L.** Švytuojamąjį judesio variklio ir stūmoklinio kompresoriaus pavaros švytvimų centro stabilizavimo problema // Konferencijos "Mokslas ir technologijos vakarų Lietuvoje darbai. – Klaipėda: Klaipėdos universitetas. –1999. – P. 45-51.

Pateikta spaudai 2004 05 05

S. Kudarauskas, A. Senulis, L. Simanynienė. Švytuojamąjį variklio-kompresoriaus švytvimų centro valdymas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr.7(56). – P.66–69.

Straipsnyje nagrinėjamos švytuojamąjį variklio pavaros švytvimų centro valdymo (stabilizavimo) problemos, kurios ypač aktualios kompresoriaus pavaros atveju. Švytvimų centras dažniausiai stabilizuojamas mechaninėmis spyruoklėmis, kurios pabrangina pavarą, sumažina jos patikimumą. Švytuojamąjį sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio matematinio modelio tyrimu parodyta, kad švytvimų centro dreifą galima riboti ir valdyti elektriškai, naudojant tiristorių. Taigi įmanoma bespyruoklė kompresoriaus pvara ir bejutiklis švytvimų centro valdymas pagal srovės nuolatinę dedamąją, panaudojant sudėtingą valdymo algoritmą. Švytuojamąjį variklio-kompresoriaus fizinio modelio tyrimu patvirtintos kai kurios matematinio modelio skaitinio imitavimo išvados bei tokios pavaros švytvimų centro valdymo aktualumas. Il. 9, bibl. 6 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

S. Kudarauskas, A. Senulis, L. Simanynienė. Oscillation Centre Control of the Oscillating Motor-Compressor // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technology, 2004. – No.7(56). – P.66–69.

This paper presents the oscillation centre control (stabilisation) problems of the oscillating motor, which are very relevant for a compressor drive. Mechanical springs are mostly used to stabilise the oscillation centre, but this solution makes the drive more expensive and unreliable. An analysis of the mathematical model of oscillating synchronous pulsating current motor shows that the limitation and electrical control of oscillation centre drift can be realised by thyristor control for this type of motor. So, it is possible to create springless compressor with sensorless control of oscillation centre according to direct-current component by using complex control algorithm. Some results of numerical simulation of the oscillating motor-compressor mathematical model are corroborated by experiment of the physical model. The importance of oscillation centre control of oscillating motor-compressor is illustrated as well. Ill. 9, bibl. 6 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

С. Кудараускас, А. Сянулис, Л. Симанинене. Управление центром колебаний колебательного двигателя-компрессора // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – №. 7(56). – С. 66–69.

В статье рассматриваются проблемы управления (стабилизации) центра колебаний колебательного двигателя, которые являются весьма актуальными для привода компрессора. Центр колебания очень часто стабилизируется механическими пружинами, которые удорожают устройство и уменьшают его надежность. Исследованием математической модели синхронного колебательного электродвигателя пульсирующего тока показано, что дрейф центра колебаний может быть ограничен и управляем электрически в случае использования тиристорного управления токового двигателя. В таком случае возможен безпружинный компрессор и бездатчиковое управление центром колебаний на основе оценки постоянной составляющей тока с использованием сложного алгоритма управления. Анализ физической модели колебательного двигателя-компрессора подтвердил некоторые выводы цифрового моделирования и актуальность управления центром колебаний токового электропривода. Ил. 9, библи. 6 (на литовском языке; резюме на литовском, английском и русском языках).